

Área: Sustentabilidade | Tema: Temas Emergentes em Sustentabilidade

### **Caracterização granulométrica real e efetiva do sedimento transportado em suspensão**

### **Absolute and effective granulometric characterization of transported suspended sediment**

Tauris Santos Rangel, Jean Paolo Gomes Minella, Alice Prates Bisso Dambroz e Felipe Bernardi

#### **RESUMO**

A granulometria controla sensivelmente a dinâmica dos processos erosivos e a dispersão de poluentes, desde a formação dos sulcos de erosão até a entrega dos sedimentos ao rio, governando as fases de desagregação, transporte e deposição, bem como a habilidade de transportar elementos químicos adsorvidos. O trabalho objetivou caracterizar a distribuição granulométrica do sedimento transportado em suspensão, considerando o tamanho real e efetivo e, através das diferenças encontradas, discutir o impacto da granulometria nos mecanismos de transporte e dispersão de poluente pela descarga sólida de uma bacia com alta complexidade granulométrica e elevado uso de agroquímicos. A área de estudo localiza-se na bacia do arroio Guarda-Mor localizada no rebordo do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul. A caracterização procurou demonstrar os efeitos do tamanho das partículas transportadas na forma agregada (tamanho efetivo) em relação à distribuição absoluta. Foram coletadas três amostras durante a subida do nível em um evento de chuva-vazão. A análise granulométrica foi realizada por difração a laser. Para a análise do tamanho efetivo, as amostras foram analisadas no mesmo dia da coleta sem nenhum tipo de pré-tratamento e, para análise do tamanho real, fez-se a queima da MO por combustão seca e a dispersão total através da energia ultrassônica. A energia para a dispersão total do sedimento foi obtida através da curva de dispersão do solo com maior energia de agregação. A fração transportada na forma agregada foi a menor que 20  $\mu\text{m}$ , acima de 20  $\mu\text{m}$  foram as enriquecidas pela distribuição do tamanho efetivo. A maior agregação aconteceu no pico do nível, aumentando a fração grosseira em 16.67 % em relação a sua porcentagem real. Concluiu-se a granulometria efetiva pode subdimensionar significativamente a capacidade de transporte e dispersão de poluentes pela descarga sólida.

**Palavras-Chave:** Descarga sólida, tamanho absoluto, tamanho real

#### **ABSTRACT**

Granulometry sensitively controls the dynamics of erosion processes and the dispersion of pollutants, since interhall erosion formation to sediment delivery to the river, governing the phases of disaggregation, transport and deposition, as well as the ability to transport adsorbed chemical elements. The objective of this study was to characterize the granulometric distribution of the sediment transported in suspension, considering the actual and effective size and, through the differences found, to discuss the impact of granulometry on transport mechanisms and pollutant dispersion by the solid discharge of a basin with high granulometric complexity and intense use of agrochemicals. The study area is located at Guarda Mor basin at the edge of the Southern Plateau of Rio Grande do Sul. The characterization sought to demonstrate the size effects of transported particles in the aggregate form (effective size) in relation to the absolute distribution. Three samples were collected during the level rise in a rain-flow event. The granulometric analysis was performed by laser diffraction. For effective size analysis, samples were analyzed on the same day of the collection without any kind of pre-treatment and, for real size analysis, the organic matter burning was carried by dry combustion and total dispersion through ultrasonic energy. The energy for total sediment dispersion was obtained from a dispersion curve of a soil with highest aggregation energy. The transported fraction in the aggregate form was smaller than 20  $\mu\text{m}$ , and above 20  $\mu\text{m}$  were those enriched by the distribution of the effective size. The highest aggregation occurred at the peak of the level, increasing the gross fraction by 16.67% compared to its actual percentage. It was concluded that the effective granulometry can significantly undersize the transport capacity and dispersion of pollutants by solid discharge.

**Keywords:** Solid discharge, absolute grain size, effective grain size

# CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA REAL E EFETIVA DO SEDIMENTO TRANSPORTADO EM SUSPENSÃO

## 1 INTRODUÇÃO

A superfície dos solos destaca-se como a principal fonte de poluentes associados ao sedimento para os recursos hídricos por ser diretamente afetada pelas ações humanas que alteram as propriedades do solo e adicionam um amplo conjunto de agroquímicos, como fertilizantes e pesticidas. Áreas agrícolas são importantes fontes de fósforo total (P total), devido ao enriquecimento desse nutriente pela excessiva adição de fertilizantes na camada superficial (BASTOS, 2018).

A erosão superficial contribui, principalmente, com a entrega de sedimentos finos ( $< 63 \mu\text{m}$ ) para o rio. Essa fração também é chamada de fração coesiva ou fração quimicamente ativa e inclui toda a fração argila ( $< 2 \mu\text{m}$ ) e silte ( $2 - 62,5 \mu\text{m}$ ) e até parte da areia muito fina. Quanto mais fina for a sub-fração dentro da fração quimicamente ativa, mais reativa ela é. A argila, portanto, é a classe de tamanho que mais transporta poluentes para dentro do rio. Isso acontece porque ela possui uma área superficial específica (ASE) maior que as outras classes, a qual é eletricamente carregada e pode fazer trocas iônicas com os elementos presentes no meio (HOROWITZ, 1991). Essa característica física da argila também promove maior energia de agregação entre suas partículas, o que aumenta ainda mais a sua capacidade em transportar poluentes e em proteger a matéria orgânica (MO) complexada entre suas partículas minerais, responsável por adsorver contaminantes orgânicos (CHRISTENSEN, 1992; BURTON Jr., 2003); A seleção de finos no transporte de sedimento erodido da superfície do solo para o rio acontece porque, embora o escoamento superficial precise de uma maior tensão de cisalhamento para formar os sulcos de erosão em solos mais argilosos devido a coesividade da argila, em relação a areia, ela é mais facilmente transportada. Por outro lado, apesar da areia ser mais facilmente desagregada que a argila, o maior tamanho e a maior densidade da partícula de areia limitam seu transporte durante a fase de transporte, propiciando a deposição nas partes baixas do terreno e reduzindo a sua proporção na taxa de entrega de sedimentos ao rio (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 2009)

Dentro do rio, a porcentagem real de finos assume importância fundamental para inferir sobre a verdadeira capacidade de transporte e dispersão de poluentes pela descarga sólida. No entanto, as partículas coesivas, destacando-se a argila, dificilmente é encontrada sendo transportada individualmente na seção do rio. Essas partículas se encontram agregadas umas às outras formando o sedimento em seu tamanho efetivo (GRANGEON et al., 2014). O tamanho efetivo corresponde a unidade de alta complexidade composta de partículas minerais, matéria orgânica, água e vazios que no solo é chamada de agregado e, após ser desagregada pelo escoamento superficial, passa a ser chamada de sedimento na forma agregada (DROPPPO et al., 2005). O tamanho real se refere as partículas minerais ou primárias de argila, silte e areia e a caracterização granulométrica real do solo e do sedimento é como suas partículas minerais estão distribuídas nas três principais classes de tamanho. Para determinar a diferença entre a porcentagem real e efetiva de cada classe é preciso utilizar a dispersão das amostras, seja de solo ou de sedimento, e a comparar as diferenças entre as classes granulométricas.

O tamanho real é fundamental em estudos que utilizam rastreadores como  $^{137}\text{C}$  e  $^{210}\text{Pb}$  para identificar fontes de entrega de sedimento ao rio (SINGLETON et al., 2017), ou a áreas de depósito em partes baixas do terreno. Isso porque o enriquecimento dos traçadores em áreas de depósito pode não corresponder a taxa de erosão da fonte de contribuição devido a seleção de sedimentos finos no transporte, significativamente mais ricos nesses elementos (TAYLOR; BLAKE; KEITH-ROACH, 2014). Para não haver superestimação nas taxas de erosão das áreas

contribuintes, é necessária a caracterização granulométrica real com a correção das concentrações dos traçadores que pode ser feita de acordo com parâmetros como a ASE nas partículas minerais (TAYLOR; BLAKE; KEITH-ROACH, 2014; LACEBY et al., 2017).

A caracterização do tamanho efetivo pode subestimar o potencial de transporte e dispersão de poluentes pela descarga sólida, isso acontece porque a agregação entre finos (argila e silte) aumenta a proporção da fração grosseira ( $> 63 \mu\text{m}$ ) que é considerada inerte (MEURER, 2006). No entanto, é o tamanho efetivo, através das suas características que controlará a sua redução de deposição pela menor densidade que, juntamente com as condições de fluxo, vai governar a dinâmica de transporte dos poluentes pelo sedimento no rio (STONE e WALLING, 1997).

O manejo do sedimento em bacias hidrográficas para mitigar os impactos causados pela erosão necessita de estudos mais amplos de sedimentos finos, como a diferença entre o tamanho real e o tamanho efetivo do sedimento entregue ao rio (SHI et al., 2017), que proporcionem melhores previsões do comportamento desses sedimentos em relação aos poluentes que transportam (POLETO et al., 2009; MANAP; VOULVOULIS, 2015; FOX et al., 2016). Como poluentes podem se manter associados na matriz mineralógica do sedimento fino e na matéria orgânica complexada entre seus minerais por longos períodos (BURTON Jr., 2003; LI et al., 2015; GATI et al., 2016; JIANG et al., 2018;), a retirada do sedimento fino contaminado do leito dos canais e reservatórios pelo órgão gestor responsável é indispensável. No entanto, medidas corretivas como a retirada desse sedimento com uso de draga, por exemplo, são muitas vezes onerosas e caras para a gestão pública (OWENS et al., 2005; FOX et al., 2016). Logo, o método em que a granulometria é medida (a partir do tamanho real ou do tamanho efetivo) fornece informação fundamental para definir os processos de desagregação, transporte e deposição, bem como a capacidade de transporte e dispersão de poluentes pelo sedimento.

O objetivo geral desse trabalho foi determinar a distribuição granulométrica dos sedimentos transportados em suspensão, considerando seu tamanho real e efetivo e, a partir das diferenças encontradas, discutir o impacto da granulometria nos processos erosivos e de dispersão de poluentes na escala da bacia. Entre os objetivos específicos estão a) definir a energia necessária para a desagregação total da fração mineral dos solos e sedimentos considerando a energia ultrassônica, b) caracterizar o tamanho real e efetivo do solo e dos sedimentos em suspensão dos materiais transportados na bacia e c) avaliar em cada classe granulométrica a proporção do material transportado na forma agregada.

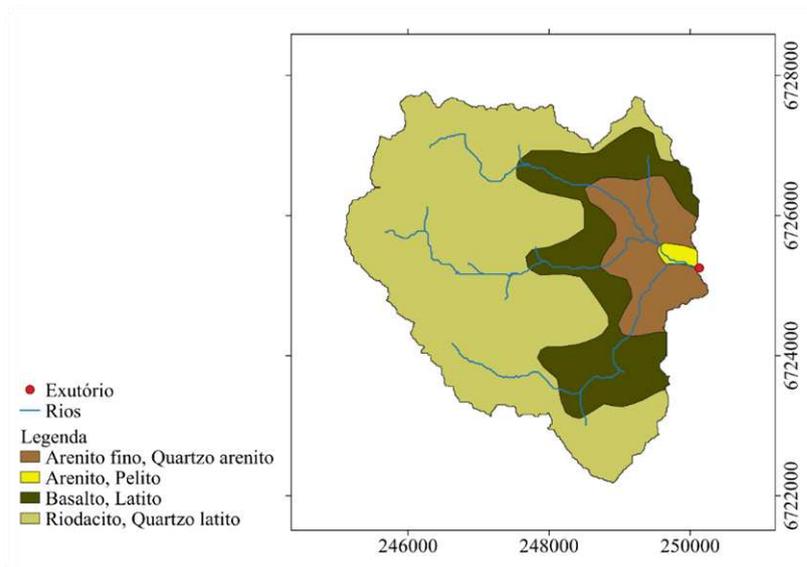
## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

O Arroio Guarga-Mor está localizado no Rebordo do Planalto, situado entre o Planalto e a Depressão Central do Rio Grande do Sul. A área delimitada para esse estudo abrange 19 km<sup>2</sup> da área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Soturno. De acordo com a classificação Köppen, o clima da região é classificado como subtropical do tipo Cfa 2. Tem uma precipitação média anual de 1700 mm e uma temperatura média de 19 °C. A parte superior da bacia e o terço médio, pertence à região do Planalto. A parte superior da bacia, em altitudes mais elevadas (acima de 350 m) tem relevo predominantemente ondulado (declividade de 5 a 10%), enquanto no terço médio (240 a 350 m de altitude) o relevo é escarpado (declividade acima de 70%). Na região da Depressão Central, encontra-se a parcela mais baixa da bacia (de 110 a 240 m de altitude), cujo relevo é plano (declividades de 0 a 2%). O Riodacito, presente na parte superior, e o Basalto, que compõe o terço médio da bacia, são rochas de origem vulcânica, enquanto a parte mais baixa é formada por afloramentos de arenito que são rochas de origem sedimentar

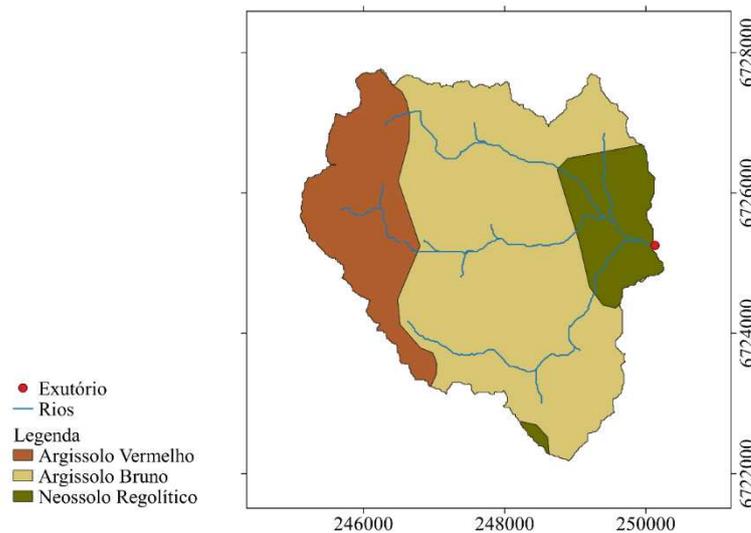
(Figura 1). Os solos observados são classificados como Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Bruno (PB) e Neossolo Regolítico (QR) (EMBRAPA, 2013) (Figura 2).

Figura 1 – Delimitação da área de estudo com as principais formações geológicas.



Fonte: Autores

Figura 2 - Delimitação da área de estudo com as três principais classes de solo observadas.



Fonte: Autores

A área de estudo apresenta grande variabilidade no material de origem, fator determinante para a natureza dos argilominerais durante o processo de formação do solo (CAMARGO; OLIVEIRA; JACOMINE, 1992). Na bacia há rochas vulcânicas extrusivas, que contribuem para a formação de maior porcentagem de finos o que, de uma maneira geral,

aumenta a agregação entre a fração mineral do solo (MEURER, 2006) e afloramentos de arenito, que contribuem para a formação de solos com predomínio de material grosseiro, com baixa energia de agregação e baixo teor de argila (MEURER, 2006; SHI et al., 2017). Além disso, o relevo, que participa ativamente da formação do solo principalmente por controlar o intemperismo físico causado pela água (DALMOLIN; AZEVEDO; PEDRON, 2006), é marcado por uma área de transição. Isso tudo torna a bacia do Arroio Guarda-Mor um lugar interessante para o desenvolvimento do estudo, já que a complexidade dos processos de formação do solo interferem na distribuição granulométrica da fonte e, conseqüentemente, no processo de entrega de sedimentos ao rio que pode ser medido através da diferença entre o tamanho real e o tamanho efetivo do material transportado em suspensão (STONE; WALLING, 1997; SHI et al., 2017).

## 2.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

### 2.2.1 Coleta das amostras de solo e sedimento

As amostras de água e sedimento em suspensão foram coletadas manualmente com um galão de 20 L no exutório da bacia durante um evento de chuva-vazão, sendo uma amostra no início do evento, uma na ascensão do nível e uma na vazão de pico do evento. Para a amostragem do sedimento escolheu-se a vertical onde, visualmente, o fluxo era mais intenso. As amostras de solo foram coletadas na camada superficial de 20 cm de cada um dos três solos da bacia em três pontos diferentes conforme a distribuição espacial das principais classes. Após as coletas, as amostras de solo foram colocadas em estufa a 50 °C, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

### 2.2.2 Energia para a desagregação total do solo e do sedimento através da energia ultrassônica

O solo que obteve maior porcentagem de argila na energia zero foi usado para fazer a curva de dispersão. Para isso, fez-se a combustão seca da MO da TFSA na mufla a 500°C durante 8 h, antes da determinação da argila dispersa para diferentes níveis de energia de sonificação. A dispersão do solo através da energia ultrassônica foi feita em amostras de solo de 2 g adicionadas em um béquer com 40 mL de água deionizada e submetidas a níveis crescentes de energia (0, 200, 400, 600, 800, 1200, 1600 e 2000 J mL<sup>-1</sup>), em aparelho de ultrassom Vibracel, marca SONICS & MATERIALS, modelo VC 750, equipado com sonda de 136 mm de comprimento e 13 mm de diâmetro. A energia ultrassônica  $E$  aplicada ao solo é calculada pela Equação (1). A potência de aplicação de energia foi de 11 J s<sup>-1</sup>, durante o tempo necessário para atingir a energia total pré-programada em J, que dividida pelo volume da amostra deve corresponder a energia ultrassônica  $E$  desejada.

$$E = \frac{P \times t}{V} \quad (1)$$

Onde:  $P$  é a taxa de energia aplicada a amostra em J s<sup>-1</sup>;  $V$  é o volume total de água e sedimento em ml, considerando a densidade do sedimento igual a 2,65 g cm<sup>-3</sup>\*;  $t$  é o tempo que a amostra é submetida a taxa de energia emitida pela ponteira do ultrassom em s.º

O teor de argila dispersa nas amostras nos diferentes níveis de energia foi determinado por difração a laser pelo granulômetro modelo CILAS 13320. A mistura de água e solo foi

---

\* Valor comumente arbitrado na literatura quando a densidade do solo não é medida.

transferida para uma seringa que foi agitada a cada repetição antes de aplicar o volume necessário para a leitura pelo aparelho. A completa dispersão do solo em partículas primárias foi verificada através da estabilização do teor de argila dado pela curva de dispersão. A Equação (2) é ajustada para os dados, e dá a energia necessária para dispersar o teor de argila indicado pelo parâmetro  $a$  da equação que descreveu a curva de dispersão.

$$y = a(1 - e^{-bx}) \quad (2)$$

Cada energia foi aplicada em uma única amostra da qual foi feita três repetições da leitura. Por padrão, indica-se fazer três repetições da amostra, mas esse procedimento seria oneroso devido a ampla faixa de energia aplicadas e ao desgaste que o experimento causaria a ponteira do ultrassom. Além disso, o principal ponto na metodologia foi perceber a sensibilidade do aparelho a laser em relação a mesma amostra e a maneira como a esta foi processada.

### **2.2.3 Caracterização granulométrica real e efetiva do sedimento**

Para a análise granulométrica efetiva do sedimento as amostras foram levadas para o laboratório e a análise da granulometria por difração a laser foi feita no mesmo dia, sem nenhum tipo de pré-tratamento. A amostra de água e sedimento contida no galão foi agitada e transferida para um balde onde foi perturbada por um êmbolo improvisado e, imediatamente, coletou-se a amostra para a leitura no granulômetro com uma seringa. Esse procedimento buscou representar todas as frações da amostra, pois a fração mais grosseira pode decantar rapidamente.

Para a análise granulométrica real do sedimento em suspensão, os galões foram postos a decantar por 8 dias e o sedimento depositado no fundo foi transferido para um recipiente aberto, onde permaneceu até a secagem completa em uma estufa com circulação de ar a 50 °C. O pré-tratamento do sedimento seco incluiu a queima da MO na mufla a 500 °C por 8 h e posterior dispersão total da amostra em partículas primárias pelo ultrassom da mesma forma que foi feita a dispersão das amostras o solo. A energia ultrassônica aplicada para a dispersão total do sedimento foi a energia onde ocorreu a estabilização do teor argila pela curva de dispersão do solo com maior energia de agregação.

Foram feitas três repetições da leitura de cada amostra no granulômetro para a determinação de um diâmetro médio “verdadeiro” tanto para o tamanho real quanto para o tamanho efetivo, bem como para o estabelecimento de uma faixa de erro do valor medido em cada repetição em relação ao diâmetro médio considerado verdadeiro (ISO/IEC 99:2007). As repetições garantem maior confiabilidade do dado medido ao mesmo tempo que fornecem a incerteza inerente a análise.

### **2.2.4 Caracterização granulométrica real e efetiva do solo**

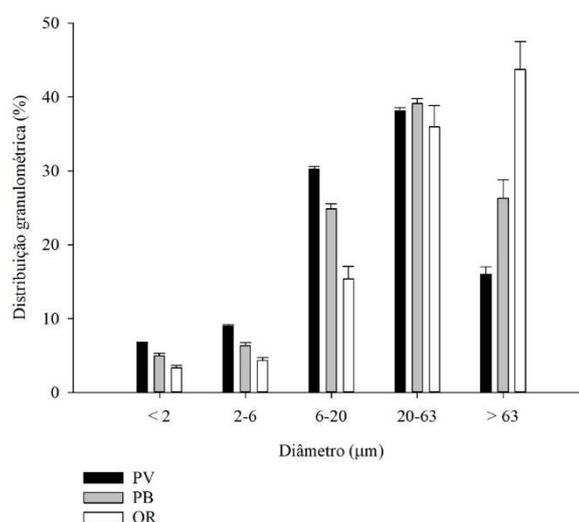
A caracterização granulométrica efetiva do solo com maior energia de agregação foi feita utilizando-se uma amostra da fração de TFSA do solo seco sem nenhum tipo e pré-tratamento. Enquanto a caracterização granulométrica real foi feita com a amostra de água e solo disperso na maior energia aplicada. Da mesma forma que a análise granulométrica do sedimento, foram feitas três repetições na leitura de cada amostra pelo granulômetro para a determinação do diâmetro real e efetivo médio.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### 3.1 DEFINIÇÃO DA ENERGIA PARA A DESAGREGAÇÃO TOTAL DO SOLO E DO SEDIMENTO CONSIDERANDO A ENERGIA ULTRASSÔNICA

Para identificar o solo com maior energia de agregação na fração mineral, foi feita a análise granulométrica na energia zero dos três diferentes solos da bacia após a queima da MO. A amostra de PV foi a que apresentou uma maior porcentagem de argila em relação ao volume total da amostra (Figura 3). Apesar desse resultado não corresponder a fração real de argila por não ter sido feita a dispersão do solo, o PV apresenta também uma maior proporção entre as sub frações mais finas da fração coesiva, silte fino (2 a 6  $\mu\text{m}$ ) e médio (6 a 20  $\mu\text{m}$ ) que, mesmo em menor grau quando comparado a argila, também apresentam maior resistência a desagregação em relação as frações mais grosseiras.

Figura 3 - Distribuição granulométrica dos três solos da bacia, Argissolo Vermelho (PV), Agissolo Bruno (PB) e Neossolo Regolítico (QR) com a faixa de erro dada pelas três repetições da análise granulométrica a laser após a queima da MO.



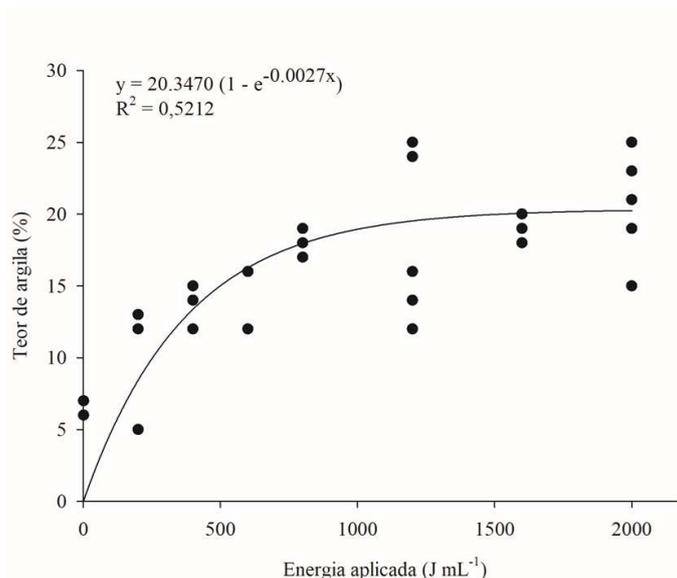
Fonte: Autores

Usar o teor de argila para definição da energia de dispersão pode se mostrar um critério equivocado, principalmente em solos altamente intemperizados que possuem grande variabilidade na natureza mineralógica da argila, a qual é composta, predominantemente, por diferentes proporções de caulinita, óxidos de alumínio (gibbsita) e de ferro (hematita, goethita e maghemita) (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; INDA JR; KÄMPF, 2005; INDA Jr et al., 2007). No entanto, o PV e o PB que apresentam um potencial maior de agregação entre as suas partículas minerais em relação ao QR, são formados predominantemente pelo mesmo material de origem (Riodacito). Por tanto, considerando a escala da bacia de estudo e que esses solos se formam a partir do mesmo material de origem, fator de formação do solo determinante na constituição dos argilominerais, entende-se que o teor de argila poderia ser o principal critério para determinar a energia necessária de dispersão.

Aplicaram-se níveis crescentes de energia em frações da amostra de PV até que a proporção do teor de argila estabilizasse. As amostras foram submetidas até a energia de 2000

J mL<sup>-1</sup> (Figura 4). Apesar da grande amplitude dos resultados da proporção de argila em cada nível de energia podemos considerar que houve uma tendência de estabilidade acima de 1500 J mL<sup>-1</sup>. Embora não haja um valor de energia ultrassônica padrão para a dispersão total do solo, a estabilização da proporção de argila ficou na mesma faixa encontrada por outros estudos (CHRISTENSEN, 1992; CESARE; DE et al., 2000; INDA Jr et al., 2007), ou seja, na faixa entre 1500 a 1800 J mL<sup>-1</sup>. A energia necessária a dispersão total do PV pode ser devido à grande proporção partículas minerais coesivas com 18.95 % de argila, 30.83 % de silte fino e 33.84 % de silte médio.

Figura 4 - Curva de dispersão do Argissolo Vermelho (PV) com a estabilização do teor de argila para níveis crescentes de energia.



Fonte: Autores

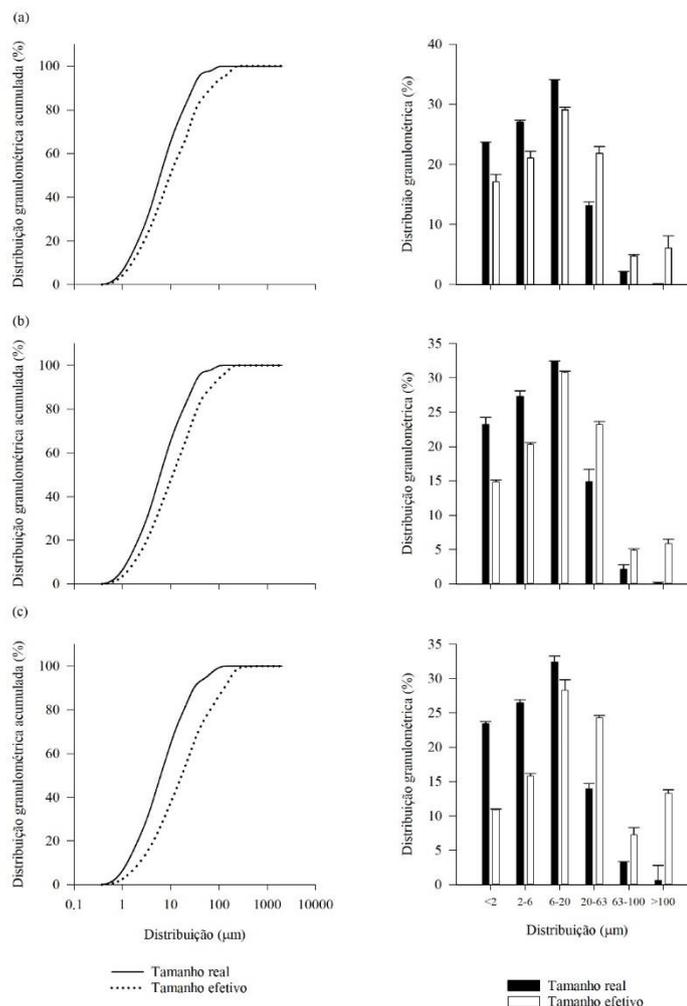
A dispersão em cada uma das oito energias aplicadas são os resultados das repetições lidas pelo granulômetro em uma única amostra. Já para as energias 1200 e 2000 J mL<sup>-1</sup> foram analisadas duas amostras com três repetições cada, considerando que houve maior variação entre as repetições da primeira amostra. Mesmo nas outras energias, notou-se grande variação do teor de argila, por exemplo na energia de 200 J mL<sup>-1</sup>. Nos pontos de 800 e 1.600 J mL<sup>-1</sup> houve a menor dispersão entre as leituras. As variações encontradas entre as repetições podem estar relacionadas à influência da forma das partículas na leitura pelo granulômetro que considera a teoria de Mie que descreve a dispersão de um feixe luminoso causado por uma partícula esférica (ISSO 13320:2009). O pressuposto de que as partículas seguem um padrão esférico pode estar prejudicando a reprodutibilidade das leituras em cada repetição (SOCHAN et al., 2015). Além disso, o procedimento de homogeneização com a agitação da amostra contida na seringa, a cada repetição da leitura, pode estar sujeito a erros por parte o operador. Ainda assim, os resultados demonstram um padrão claro que o teor de argila do PV estabiliza entre 1.500 e 2.000 J mL<sup>-1</sup>.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA REAL E EFETIVA DO SEDIMENTO TRANSPORTADO EM SUSPENSÃO

A Figura 5 mostra como a distribuição granulométrica real e efetiva variou durante o evento. A distribuição do tamanho real praticamente não varia, mas sim a forma como fração menor que 20  $\mu\text{m}$  se distribui em frações maiores ao longo do evento. A fração menor que 20  $\mu\text{m}$  é a fração que está sendo transportada na forma agregada, acima de 20  $\mu\text{m}$  são as frações que estão sendo enriquecidas pela distribuição no tamanho efetivo. Com a subida do nível, aumenta a proporção de material nas frações maiores que 20  $\mu\text{m}$ , deslocando a curva granulométrica efetiva para a direita. Na vazão de pico, as partículas transportadas em suspensão chegam a alcançar frações maiores que 100  $\mu\text{m}$ . O aumento do tamanho efetivo é devido ao aumento da velocidade da corrente, que aumenta a capacidade do escoamento superficial em transportar partículas maiores e mais densas. Com isso, pode haver a ressuspensão de partículas grosseiras depositadas no fundo do leito (WALLING et al., 2000).

Como esperado, a argila é a classe que tem a maior porcentagem de material transportado na forma agregada devido a maior energia de agregação. A argila está sendo transportada principalmente na fração de grosseira, que aumenta com a subida do nível (Tabela 1). A vazão de pico correspondeu ao momento onde teve a maior porcentagem de material fino sendo transportado na forma agregada com 16.75 % da fração quimicamente ativa sendo transportada na forma agregada.

Figura 5 – Curva com a distribuição granulométrica média do sedimento transportado em suspensão durante (a) o início do evento, (b) a ascensão do nível e (c) vazão de pico do evento de chuva-vazão monitorado seguida da porcentagem média nas principais frações de tamanho acompanhada do erro medido.



Fonte: Autores

Tabela 1 - Material transportado em porcentagem nas principais frações de tamanho considerando o tamanho real e o tamanho efetivo.

Diâmetro (µm)	Início do evento		Ascensão do nível		Vazão de pico	
	Efetivo	Real	Efetivo	Real	Efetivo	Real
< 2	17.10	23.54	14.88	23.21	10.92	23.39
2-6	21.06	27.04	20.33	27.31	15.85	26.46
6-20	29.08	33.95	30.78	32.32	28.36	32.39
20-63	21.88	13.18	23.22	14.87	24.30	13.94
> 63	10.86	2.27	10.79	2.29	20.57	3.82

Fonte: Autores

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA REAL E EFETIVA DO SOLO

A porcentagem de argila encontrada no solo foi menor que a porcentagem de argila no sedimento, evidenciando o processo seletivo da erosão e transporte de sedimentos, em que as partículas menores são carregadas mais longinquamente e as partículas maiores são depositadas ao longo do relevo (Figura 6) (STONE; WALLING, 1997; SHI et al., 2017). Apesar da maior densidade e do maior tamanho das partículas grosseiras que facilitam a seleção dessa classe de tamanho em áreas de depósito antes da entrega dos sedimentos ao rio, de acordo com a Tabela 2, o sedimento apresentou uma porcentagem na fração grosseira bem próxima do solo, sendo, inclusive, maior no início na vazão de pico do evento. A fração grosseira provavelmente está vindo do banco de sedimentos do rio que, com o aumento do fluxo durante o evento, é revolvido e passa a contribuir para o material transportado em suspensão.

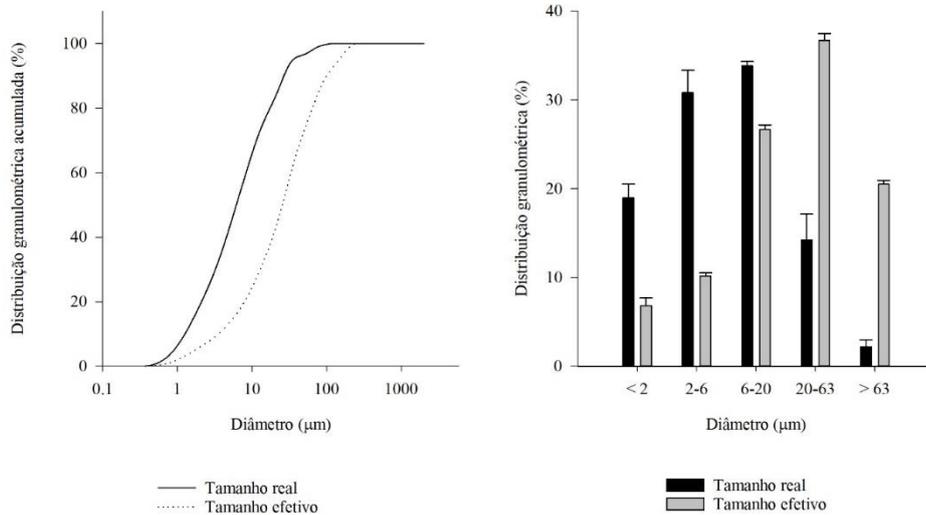
Tabela 2 - Distribuição granulométrica real do solo e do sedimento nas principais frações de tamanho.

<b>Diâmetro (µm)</b>	<b>PV</b>	<b>Início do evento</b>	<b>Ascensão do nível</b>	<b>Vazão de pico</b>
< 2	18.95	23.54	23.21	23.39
2-6	30.83	27.04	27.31	26.46
6-20	33.84	33.95	32.32	32.39
20-63	14.22	13.18	14.87	13.94
> 63	2.16	2.27	2.29	3.82

Fonte: Autores

A energia de agregação entre as partículas minerais do solo é maior que entre as partículas minerais do sedimento o que aumenta o tamanho do agregado de solo comparado ao tamanho efetivo do sedimento em suspensão. No solo, a agregação da fração < 20 µm, destacando-se a fração argila, enriquece a fração grosseira em 18.36 % (Figura 6). No sedimento a fração grosseira só é enriquecida mais significativamente quando o rio atinge a vazão de pico, aumentando 16.75 % em relação a proporção real de areia com o aumento da capacidade de transporte pelo escoamento (Figura 5 c).

Figura 6 - Curva granulométrica real e efetiva do PV seguida da distribuição entre as principais frações de tamanho.



Fonte: Autores

### 3.4 IMPORTÂNCIA DO TAMANHO REAL E DO TAMANHO EFETIVO NO TRANSPORTE DE POLUENTES PELO SEDIMENTO DENTRO DO SISTEMA DO RIO

Modelos de dispersão de poluentes podem usar a distribuição granulométrica efetiva desde que se conheça a proporção de material fino transportada na forma agregada. Isso porque, ao subdimensionar a quantidade de material transportado em suspensão na fração quimicamente ativa, ela também subdimensiona as taxas de transporte de dispersão de nutrientes preferencialmente associados a fração fina. Em um estudo que caracterizou a distribuição granulométrica e a concentração de P total, C total e N total em amostras de sedimentos em suspensão durante eventos, Kochem (2014) determina as taxas de nutrientes transportados pela descarga sólida associadas a fração de finos ( $< 63 \mu\text{m}$ ), e a fração grosseira ( $> 63 \mu\text{m}$ ). Na Tabela 3 tem-se a quantidade de P total transportada pela descarga sólida durante o evento que ocorreu do dia 2 ao dia 4 de dezembro de 2012 na bacia do Rio Conceição. Com uma área de 84 000 ha, a bacia está localizada no planalto do Rio Grande do Sul. Entre os usos, destaca-se o cultivo agrícola que correspondem a pecuária e a produção de grãos. Apesar do plantio direto, com o cultivo predominante da soja no verão e do trigo no inverno, frequentemente são observados sulcos formados pela erosão hídrica nas áreas sob este sistema de manejo.

Tabela 3 - Estimativa do P total transportado pela fração fina e pela fração grosseira durante o evento para a bacia do Rio Conceição.

Data	P tot <sup>(1)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )		R <sup>(2)</sup>	P tot <sup>(1)</sup> (ton)	P total <sup>(3)</sup> (ton)	
	> 63 µm	< 63 µm			> 63 µm	< 63 µm
02/10/2012	853.5	1320.7	0.65	5.54	2.17	3.37
03/10/2012	739.4	1399.7	0.53	7.63	2.64	4.99
03/10/2012	753.6	1410.1	0.53	1.12	0.39	0.73
04/10/2012	593.9	1315.1	0.45	0.17	0.05	0.12
<b>Total</b>					5.26	9.20

<sup>(1)</sup> Valores retirados de Kochem (2014).

<sup>(2)</sup> R = razão entre a concentração de P total (mg kg<sup>-1</sup>) na fração grosseira e a concentração de P total na fração fina.

<sup>(3)</sup> Valores calculados a partir de R.

Fonte: Autores

Para a determinação do P total, primeiramente as amostras de sedimento foram passadas em uma peneira de malha 63 µm. Dessa forma, se obteve as frações maiores e menores que 63 µm. Em cada uma dessas frações se efetuou as análises de P total. Supondo uma situação hipotética em que a) a descarga de sedimentos do Rio Conceição durante o evento do dia 2 a 4/10/12 mantivesse a mesma distribuição granulométrica durante todo evento, b) essa fosse idêntica a distribuição encontrada na vazão de pico do evento caracterizado nesse estudo para a descarga de sedimento do Arroio Guarda-Mor, considerando o tamanho real e efetivo e c) a determinação do P total, nas frações maiores e menores que 63 µm, fosse feita considerando o tamanho real e efetivo, pode-se inferir que a quantidade de P total transportada pela descarga sólida em cada fração seria dada pela tabela em Tabela 4. Vale ressaltar que a dinâmica do fósforo perdido durante um evento de chuva-vazão é bastante complexa e que depende de vários fatores além da distribuição granulométrica da descarga sólida ( KOICHEM, 2014; BENDER, 2016; BASTOS, 2018). Esse exemplo é apenas uma demonstração meramente matemática de como a granulometria real e efetiva pode afetar a quantificação de elementos químicos transportados em suspensão.

Tabela 4 – Simulação da quantidade de P total em toneladas transportado pela classe fina e pela classe grosseira considerando o tamanho real e efetivo.

Data	Tamanho real		Tamanho efetivo	
	P total (ton) > 63 µm	P total (ton) < 63 µm	P total (ton) > 63 µm	P total (ton) < 63 µm
02/10/2012	0.21	5.33	1.14	4.40
03/10/2012	0.29	7.34	1.57	6.06
03/10/2012	0.04	1.08	0.23	0.89
04/10/2012	0.01	0.16	0.03	0.14
<b>Total</b>	0.55	13.91	2.97	11.49

Fonte: Autores

Obviamente, a soma do total de P perdido durante o evento permaneceu a mesma, 14.46 toneladas, pois os valores de referência de P total são os mesmos encontrados por Kochem (2014) para o evento em questão. O que mudou foi a distribuição do P total transportado em cada fração. Nesse exemplo, a caracterização granulométrica efetiva subdimensionou o transporte e dispersão de P total em 2.97 toneladas. Essa mesma quantidade passou a ser distribuída entre a fração grosseira, enriquecida de microagregados de silte e argila, que preferencialmente enriquece áreas de depósito com sedimentos finos ao invés de seguir em suspensão. Como a fração grosseira é preferencialmente depositada no leito ao invés de seguir em suspensão, é possível inferir que, nesse exemplo, a dispersão de 2.97 toneladas de fósforo para outras áreas da bacia seria foi subestimada.

Porém, ao mesmo tempo que subdimensiona a capacidade da descarga sólida em transportar poluentes, a caracterização granulométrica efetiva indica a proporção de material transportado na forma agregada em cada classe. É a diferença entre o tamanho efetivo e o tamanho real, juntamente com as condições de fluxo, que determina como o sedimento fino se comporta dentro do rio. Esse tipo de estudo pode fornecer um meio de formulação de estratégias de manejo voltadas para a forma como o sedimento poluído fino é transportado no ambiente, principalmente da perspectiva dos grandes centros urbanos ( POLETO et al., 2009; MANAP; VOULVOULIS, 2015). É comum que os poluentes químicos estejam fortemente associados a superfície da argila ou então adsorvidos em sua matriz interior em áreas de depósito de sedimentos dentro do rio, o que dificulta a biotransformação e torna a dessorção muito lenta. Dessa forma, contaminantes podem permanecer associados aos sedimentos por longos períodos ( LI et al., 2015; GATI et al., 2016),

#### 4 CONCLUSÕES

A caracterização granulométrica real do sedimento manteve-se praticamente constante ao longo do evento com a maior parte do material transportado pertencendo a classe de silte fino e silte médio, seguido da argila. O nível máximo foi o momento de maior enriquecimento de fração grosseira pela caracterização granulométrica efetiva, sendo também o momento em que a fração quimicamente ativa foi mais subestimada, assim como a capacidade de transporte e dispersão de poluentes pela descarga sólida. O solo apresentou alta energia de agregação que pode ser devido a elevada proporção na fração coesiva ou a natureza mineralógica da argila. De qualquer maneira, a alta energia de agregação levou a caracterização granulométrica efetiva a superestimar a fração grosseira. O solo e o sedimento apresentaram grande proporção de material na fração de silte fino e silte médio na condição efetiva, indicando a seleção no transporte dessa classe durante a formação dos sulcos de erosão pelo escoamento superficial.

#### REFERÊNCIAS

BASTOS, F. DE. **Estratégias para o monitoramento da qualidade da água em bacias rurais de cabeceira**. 2018. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

BENDER, M. A. **Dinâmica da perda de P durante eventos de chuva-vazão na bacia hidrográfica de Arvorezinha**. 2016. 57 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

BURTON JR., G. A. Sediment quality criteria in use around the world. **Limnology**, v. 3, n. 2, p. 65–76, 2003.

CAMARGO, M. N.; OLIVEIRA, B. J.; JACOMINE, P. K. T. **Classes Gerais de Solos do Brasil**. 2 ed. Jaboticabal: UNESP, FUNEP, 1992. 201 p.

CESARE, F. DE et al. Use of sonication for measuring acid phosphatase activity in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 6, p. 825–832, 2000.

CHRISTENSEN, B. T. **Physical Fractionation of Soil and Organic Matter in Primary Particle Size and Density Separates**. v. 20, p. 1–90, 1992.

DALMOLIN, R. S. D.; AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. A. **Solos & Ambiente**, II Fórum. Santa Maria: Orium, 2006.

DROPPO, I. G. et al. Can flocs and water stable soil aggregates be differentiated within fluvial systems? **Catena**, v. 60, n. 1, p. 1–18, 2005.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2013.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 23, n. 3, p. 507–514, 1999.

FOX, G. A. et al. Reservoir Sedimentation and Upstream Sediment Sources: Perspectives and Future Research Needs on Streambank and Gully Erosion. **Environmental Management**, v. 57, n. 5, p. 945–955, 2016.

GATI, G. et al. The ecological risk of heavy metals in sediment from the Danube Delta. **Ecotoxicology**, v. 25, n. 4, p. 688–696, 2016.

GRANGEON, T. et al. From soil aggregates to riverine flocs: A laboratory experiment assessing the respective effects of soil type and flow shear stress on particles characteristics. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 13, p. 4141–4155, 2014.

GUERRA, A. T.; SILVA, A. S. DA; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Bertrand: Brasil, 2009.

HOROWITZ, A. J. **A Primer on sediment-trace element chemistry**. 2 ed. U.S.G.S. Open-file report, 1991. 136 p.

INDA JR, A. V. et al. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, v. 37, n. 5, p. 1301–1307, 2007.

INDA JR, A. V. I.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 29, n. 6, p. 851–866, 2005.

JIANG, Z. et al. Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 157, n. March, p. 1–8, 2018.

KOCHEM, M. L. **Características granulométricas, carbono, nitrogênio e frações de fósforo em sedimentos durante eventos chuva-vazão em bacias hidrográficas no Rio Grande do Sul, Brasil.** 2014. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

LACEBY, J. P. et al. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 169, n. December 2016, p. 85–103, 2017.

LI, P.; QIAN, H.; HOWARD, K. W. F.; WU, J. Heavy metal contamination of Yellow River alluvial sediments, northwest China. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 7, p. 3403–3415, 2015.

MANAP, N.; VOULVOULIS, N. Environmental management for dredging sediments - The requirement of developing nations. **Journal of Environmental Management**, v. 147, p. 338–348, 2015.

OWENS, P. N. et al. Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. **River Research and Applications**, v. 21, n. 7, p. 693–717, set. 2005.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo.** Porto Alegre: Evangraf, 2006.

POLETO, C.; BORTOLUZZI, E. C.; CHARLESWORTH, S. M.; MERTEN, G. H. Urban sediment particle size and pollutants in Southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 4, p. 317–327, 2009.

SHI, Z. et al. Exploring particle size selectivity effects during erosion of purple soils in Chongqing municipality, China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 17, n. 4, p. 1191–1196, 2017.

SILVA, A. et al. Stability of soil aggregates in Latosols and Cambisols via standard method and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3894–3903, 2016.

SINGLETON, A. A. et al. Effects of grain size, mineralogy, and acid-extractable grain coatings on the distribution of the fallout radionuclides <sup>7</sup>Be, <sup>10</sup>Be, <sup>137</sup>Cs, and <sup>210</sup>Pb in river sediment. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 197, p. 71–86, 2017.

SOCHAN, A. et al. Use of the laser diffraction method for assessment of the pipette method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 1, p. 37–42, 2015.

STONE, P. M.; WALLING, I. E. Particle size selectivity considerations in suspended sediment budget investigations. p. 63–70, 1997.

TAYLOR, A.; BLAKE, W. H.; KEITH-ROACH, M. J. Estimating Be-7 association with soil particle size fractions for erosion and deposition modelling. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 11, p. 1886–1893, 2014.

WALLING, D. E. et al. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. **Science of the Total Environment**, v. 251–252, p. 205–222, 2000.